Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (41-60)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Effect of Optimizing the Exterior Shell and Translucent Wall on Reducing the Energy Consumption of Educational Buildings in a Continental Climate with Hot Summers

Research Article

Amir Yarinezhad[1], Abbas Mahravan [2]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81531.1175

1. Introduction

Increasing energy consumption in educational spaces, as one of the leading consumers of fossil fuels, is a critical issue in the contemporary era. Research shows that buildings that do not have optimal thermal comfort hurt mental health and well-being. One of the effective passive methods of energy-saving is using thermal energy storage and thermal inertia to maintain optimal thermal comfort inside the building and reduce the energy demand of the building.

According to previous studies, favorable internal environmental conditions have a direct impact on the architectural features and executive details, which include diverse parameters, such as plan, orientation, configuration, building thermal cover features, window-to-wall ratio, and external shading of buildings.



Fig. 1. A: The modeled view of the building in Design Builder software; B: The current state of the Ehsan School building

2. Methods

This study examined an existing primary school building as a reference building to investigate the influence of using passive solutions on boosting the building's energy efficiency. The reference building was in Kermanshah City, a region with moderate winters and very hot and dry summers. Kermanshah City is at 34 degrees 30 minutes north and 47 degrees 15 minutes east and has an altitude of 1305 meters from the sea level. This study investigated the thermal behavior and comfort condition in the reference building through simulation in the DesignBuilder software version 6.1 before and after using the proposed passive solutions (Fig. 1). The passive solutions consisted of adding insulation and using light-transmitting walls in various configurations. The main studied properties of the proposed insulation were their type, thickness, and position in layering. Moreover, the effect of using different types of light-transmitting walls on boosting the energy efficiency of the building was studied considering various thicknesses of the used glass, gases in air gap, types of glass, and number of walls.

3- Results

This study examined the energy efficiency of the reference building influenced by six different types of insulation: expanded polystyrene, extruded polystyrene, glass wool, stone wool, polyurethane, and natural materials (e.g., rice husk on the north and south sides of outer walls). The results indicated that the mentioned insulations had almost the same performance. Moreover, as shown in Fig2. , adding polyurethane insulation to the exterior wall of the north classroom reduced the building heating load and discomfort time by about 14.07% (176.5 kWh) and 1.5%, respectively.

In addition, our results indicated that using polyurethane insulations of 5, 7, 10, 12, and 15 cm in the southern classroom reduced the building heating load up to 16.51%, 17.36%, 18.16%, 18.27%, and 18.65%, respectively. Furthermore, this research investigated and compared the effect of installing polyurethane insulation

---

*Manuscript received: April 29, 2023. Revised, August 23, 2023, Accepted, November 12, 2023.

[1] Master's student, Department of Architectural Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. **Email**: amiryari4543@gmail.com

[2] Corresponding author, Assistant Professor, Department of Architecture, Technical and Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran. **Email**: a.mahravan@razi.ac.ir

in four different configurations on building energy consumption (Fig. 2). The results showed that mounting 10 cm thick polyurethane insulation in the layer behind the joinery plaster (Fig. 2, layer 1) had the most significant performance.

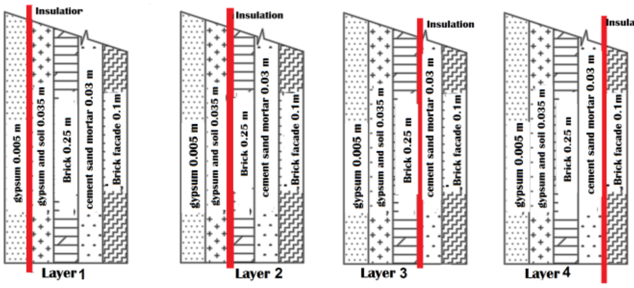


Figure 2. Insulation position in different layers of the outer wall of the studied spaces

Heat transfer and heat loss through the transmitting wall were more than the standard level. Therefore, this study investigated and compared the influences of installing nine transmitting wall configurations on mitigating the mentioned variables. The results showed that in the northern classroom, using 3×13×3 cm double-glazed windows with low-emissivity glass and argon gas decreased heat transfer and heat loss through the windows by about 28.4%, compared to the reference building.

4- Conclusion:

This study concludes that the best solutions for optimizing the energy consumption of the studied building were using polyurethane insulation with a thickness of 10 cm in layering number 1 and installing window-type 5 in the northern classroom and window-type 7 in the southern classroom. As the findings indicated, using the proposed insulations increased the cooling load of the building, known as the anti-insulation phenomenon. Therefore, this study suggests conducting more extensive research to find solutions to overcome this shortcoming.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک،۳۶، ۱، ۱۴۰۳. (۶۰-۴۱)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تأثیر بهینه‌سازی پوسته خارجی و جدار نورگذر بر کاهش مصرف انرژی و زمان بازگشت سرمایه ساختمان‌های آموزشی در اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم*

مقاله پژوهشی

امیر یاری نژاد(۱)   عباس مهروان(۲)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81531.1175

چکیده محیط داخلی راحت برای سلامتی، عملکرد و بازدهی تحصیلی دانش‌آموزان در مدارس ضروری می‌باشد. میزان بالای مصرف انرژی جهت تأمین شرایط آسایش محیطی در ساختمان‌های آموزشی ایران، این ساختمان‌ها را با مصرف انرژی بیش از ۱۶۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در زمره بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان بخش انرژی قرار داده است و نیاز به کاهش مصرف انرژی در این بخش از طریق راهکارهای هم‌ساز با محیط زیست ضروری است. هدف این تحقیق کاهش مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش در ساختمان‌های آموزشی از طریق ایجاد تغییرات در لایه‌بندی عناصر پوسته ساختمان شامل دیوارها و جدارهای نورگذر به عنوان یک راهکار ترکیبی ایستا است. روش تحقیق در این مطالعه به صورت کمی و مدل سازی آن از طریق استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر می‌باشد؛ و به بررسی وضع موجود و بهینه‌سازی انرژی ساختمان با متغیرهایی از قبیل نوع عایق حرارتی، ضخامت عایق حرارتی دیوارها، لایه‌بندی عایق، نوع و ضخامت شیشه، گازهای مابین جدار، ضخامت جدارها پرداخته شد. نتایج نشان داد که در ساختمان مورد مطالعه استفاده از عایق پلی‌اورتان در داخلی‌ترین لایه (لایه‌بندی شماره یک) کلاس درس‌های جنوبی و شمالی باضخامت ۱۰ سانتی‌متر بهینه‌ترین عملکرد را داشته است. در کلاس درس شمالی جدار نور گذر دو جداره با شیشه کم گسیل و با ضخامت شیشه ۳ میلی‌متر و جدار میانی ۱۳ میلی‌متری گاز آرگون (پنجره نوع ۵) با ۲۸/۴۰ درصد کاهش مصرف انرژی و همچنین در کلاس درس جنوبی با پنجره‌های با جدار نور گذر سه‌جداره و شیشه معمولی ۳ میلی‌متر و ۱۳ میلی‌متر هوا (پنجره نوع ۷) با۲۳/۰۴ درصد کاهش مصرف انرژی مناسب‌ترین عملکرد را در بین سایر پیکربندی‌ها داشته است. همچنین در محاسبه زمان بازگشت سرمایه مشخص شد که عایق پشم شیشه با زمان بازگشت سرمایه ۲۷/۹۲ سال مناسب‌ترین گزینه عایق‌کاری از جنبه بازگشت سرمایه است.

واژه‌های کلیدی مصرف انرژی، بهینه‌سازی انرژی، عملکرد حرارتی مدارس، عایق‌کاری حرارتی.

Investigating the Effect of Optimizing External Skins and Translucent Walls on Reducing Energy Consumption and Investment Return Time of Educational Buildings in a Temperate Climate with Dry and Very Hot Summers

Amir Yarinezhad   Abbas Mahravan

Abstract *A comfortable indoor environment is essential for the health, performance, and academic efficiency of students in schools. The high amount of energy consumption to provide environmental comfort in Iran's educational buildings has placed these buildings among the biggest consumers of the energy sector with energy consumption of more than 160 kilowatt hours per square meter, and the need to reduce energy consumption in this sector through solutions It is necessary to be compatible with the environment. The purpose of this research is to reduce energy consumption and provide comfortable conditions in educational buildings by making changes in the layering of building shell elements including walls and light-transmitting walls as a static combination solution. The research method in this study is quantitative and its modeling through the use of Design Builder software; to examine the existing situation and optimize the energy of the building with variables such as; The type of thermal insulation, the thickness of the thermal insulation of the walls, the layering of the insulation, the type and thickness of the glass, the gases between the walls, the thickness of the walls were discussed. The results showed that in the studied building, the use of polyurethane insulation in the innermost layer (behind the carpentry plaster) of the south and north classrooms with a thickness of 10 cm had the most optimal performance. In the northern classroom, a double-paned light-transmitting wall with low-emissivity glass with a thickness of 3 mm and a middle wall of 13 mm argon gas with a 28.40% reduction in energy consumption, and in the southern classroom with windows with a triple-paned light-transmitting wall and normal glass. 3mm and 13mm of air have the best performance among other configurations with a 23.04% reduction in energy consumption. Also, in the calculation of the investment return time, it was found that glass wool insulation with an investment return time of 27.92 years is the most appropriate insulation option in terms of investment return.*

Key Words Energy consumption, Energy optimization, Thermal performance of schools, Thermal insulat.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۹و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۱۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول:استادیار، گروه مهندسی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
Email: a.mahravan@razi.ac.ir
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد ، گروه مهندسی معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی ، کرمانشاه ، ایران.

مقدمه

بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده، انرژی مصرف شده در ساختمان‌های عمومی ۲۰/۱ درصد از کل انرژی را در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۴۰ تشکیل می‌دهد که این نسبت در سطح جهانی ۱/۵ درصد و در کشورهای غیر عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OCDE) سالانه ۲/۱ درصد افزایش یابد [1].

مصرف انرژی پس از رشد صنعت و شهرنشینی شدت یافته است، شهرنشینی با تأثیر بر تولید قادر است تا بر مصرف انرژی تأثیر روزافزون بگذارد [2].

تغییرات اقلیمی آب و هوای ایران را گرم‌تر و خشک‌تر خواهد کرد. این افزایش در سختی شرایط مرزی حصول اطمینان از عملکرد مناسب ساختمان‌هایی با کارایی بالا که خواص ترموفیزیکی پوسته‌ای آن‌ها برای سازگاری با آب و هوای فعلی بهینه شده است را در شرایط آب و هوایی آتی ضروری می‌نماید [3].

در ایران حدود ۷۰ درصد از مصرف انرژی مرتبط با بخش ساختمان در ساختمان‌های عمومی و دولتی به مصرف می‌رسد [4]. همچنین مصرف انرژی در فضاهای آموزشی به عنوان یکی از مصرف کنندگان اصلی سوخت‌های فسیلی، موضوعی چالش برانگیز در سال‌های اخیر بوده است [5].

علی رغم مصرف بالای انرژی که توسط یارانه‌های انرژی ترویج می‌شود، ارزیابی‌های پس از بهره‌برداری (POE) نارضایتی حرارتی را در کلاس‌های درس گزارش می‌کنند [6]. از آنجایی که بخش ساختمان‌های عمومی از جمله مدارس نقشی مثال‌زدنی در رابطه با صرفه‌جویی انرژی برای کل جامعه دارند، به عنوان یکی از نقاط آغازین پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی در ایران به شمار می‌روند [7].

آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) اعلام کرد که ساختمان‌ها مصرف کننده اصلی انرژی در جهان هستند، به طوری که پوشش ساختمان مسئول ۳۶ درصد مصرف نهایی انرژی و ۳۹ درصد انتشار دی اکسید کربن (CO_2) در سال ۲۰۱۸ بوده است [8]. همچنین یکی از استراتژی‌های غیر فعال اصلی صرفه‌جویی در انرژی، استفاده از ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و اینرسی حرارتی برای حفظ آسایش حرارتی مطلوب داخل ساختمان و کاهش تقاضای انرژی ساختمان است [9].

ساکنان اصلی مدارس کودکان و نوجوانانی هستند که میزان تنفس آن‌ها بیشتر از بزرگسالان است و اندام ها و سیستم ایمنی آن‌ها هنوز در حال رشد است، به این معنی که آن‌ها در برابر آلاینده‌های داخل ساختمان و محیط‌های حرارتی نامطلوب آسیب‌پذیرتر هستند [10]. همچنین فضای کلاس درس در طول فرایند یادگیری دانش‌آموزان، تمرکز بیشتری برای بازدهی بیشتر نیاز دارد [11]. در این راستا، معماری و کیفیت محیط داخل به‌طور مستقیم بر توانایی‌های یادگیری کودکان تأثیر می‌گذارد [12]. یک محیط حرارتی نامطلوب می‌تواند بر سلامت و ظرفیت یادگیری دانش‌آموز تأثیر منفی داشته باشد [13]، از این رو، طراحی و بهره‌برداری تخصصی مدرسه می‌تواند آسایش حرارتی، سلامت و عملکرد دانش‌آموزان را ضمن کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بهبود بخشد [14].

شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد ساختمان‌های سرد و مرطوب تأثیر منفی بر سلامت و رفاه روانی دارند [15]. دمای سرد داخل ساختمان، با مشکلات تنفسی و قلبی عروقی، از جمله افزایش فشار خون و علائم آسم و همچنین بهزیستی روانی ضعیف‌تر مرتبط است [16]. زایلر و باکسم [17] نشان دادند که دمای گرم باعث کاهش عملکرد ساکنان خواهد شد، در حالی‌که دمای سرد باعث کاهش انعطاف جسمی (ductility) و سرعت اجرای کار می‌شود. همچنین، رطوبت بالا ممکن است به دلیل افزایش اصطکاک بین پوست و لباس ناشی از افزایش تعرق، باعث ناراحتی حرارتی بیشتری شود. از سوی دیگر، رطوبت کم می‌تواند موجب تشدید علائم تنفسی مانند آسم و سوزش چشم، بینی و گلو گردد [17].

عملکرد ضعیف انرژی ساختمان‌های موجود در بسیاری از کشورها سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد [18]. حدود ۷۵ درصد از ساختمان‌های موجود در اروپا مصرف انرژی بالایی دارند [19]. در کانادا، بیشتر از ۵۰ درصد از ساختمان‌های مسکونی این کشور بیش از ۳۰ سال و ۲۰ درصد از این ساختمان‌ها بیشتر از ۵۰ سال از ساختشان می‌گذرد [20]. در جهان ساختمان‌های موجود عمدتا از انواع انرژی تجدیدناپذیر استفاده می‌کنند که در حال تخریب مواد و مصالح ساختمانی و اجزای آن هستند [21-23]. در ایران، با توجه به ویرانی‌های ناشی از جنگ هشت‌ساله ایران– عراق از یک سو و رشد سریع جمعیت در دهه ۱۹۸۰ از سوی دیگر، امکان ساخت مدارس را در سطح وسیع و

با کمترین هزینه ممکن فراهم کرد، چنین ساخت و سازهایی بدون توجه به تغییرات آب و هوایی، معمولا با مصالح و روش‌های ساخت و ساز با کیفیت پایین اجرا شده‌اند. در نتیجه، بیش از صد هزار مدرسه با مصرف انرژی بیش از ۱۶۰ کیلووات ساعت بر مترمربع پس از پایان جنگ مذکور ساخته شد که حدود ۲,۵ برابر بیشتر از مصرف انرژی در کشورهای توسعه یافته (با نرخ متوسط ۶۵ کیلووات ساعت در مترمربع) برای مدارس معمولی است [7]. بنابراین، ساختمان‌های موجود انرژی بیشتری مصرف می‌کنند و در نتیجه گازهای گلخانه‌ای بیشتری را در مقایسه با ساخت و سازهای جدید انتشار می‌دهند [24,25].

مطالعات نشان داده‌اند که شرایط محیطی داخلی در زیرساخت‌های آموزشی به شدت به ویژگی‌های معماری و جزئیات اجرایی که شامل چیدمان، جهت‌گیری، پیکربندی (configuration)، ویژگی‌های پوشش حرارتی ساختمان، نسبت پنجره به دیوار و سایه‌بان خارجی ساختمان‌ها بستگی دارد [26]. همچنین سطح آسایش حرارتی داخل ساختمان نه تنها بر محیط حرارتی داخلی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر مصرف انرژی ساختمان نیز تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، هر چه آسایش حرارتی ساختمان بیشتر باشد، مصرف انرژی آن نیز بیشتر است [27].

پیشینه تحقیق

ساداتی و همکاران [28]، عملکرد حرارتی یک ساختمان را با استفاده از روش شبیه‌سازی در سه منطقه مختلف اقلیمی ایران (اقلیم گرم کویر، نیمه‌خشک سرد و آب و هوای مدیترانه‌ای قاره‌ای) مورد بررسی قرار دادند. بر اساس یافته‌ها، انتخاب مصالح دیواری مناسب بر اساس شرایط آب و هوایی می‌تواند بارهای گرمایشی و سرمایشی سالانه و همچنین انتشار دی‌اکسید کربن را به ترتیب تا ۲۳/۲، ۲۶/۴ و ۱۸/۵ درصد کاهش دهد. بر اساس تحلیل‌های اقتصادی، زمان بازپرداخت بین ۱/۷ تا ۱۷ سال بسته به شرایط اقلیمی و نوع دیوارهای خارجی متغیر است [28]. یوسفی و همکاران [29]، عملکرد انرژی ساختمان ۹ مدرسه دولتی را با هدف ارزیابی پوسته آن‌ها در سناریوهای مختلف در سه شهر ایران شامل ایلام، تبریز و یزد را شبیه‌سازی کردند، نتایج نشان داد که مصرف گاز طبیعی برای گرمایش در همه سناریوهای از پیش تعیین شده به جز سناریوی اضافه کردن سایه‌اندازی پنجره، کاهش یافته است. بیشترین کاهش مصرف انرژی در شهر یزد متعلق به عناصر دیوارها و پس از آن سقف و پنجره به ترتیب برابر با ۴۲ درصد ۳۳ درصد و ۸ درصد بود. نتایج نهایی اجرای تمامی سناریوها شامل نسبت مساحت دیوار و پنجره، مصالح به کار رفته و سایه‌اندازی حاکی از کاهش معنادار مصرف گاز طبیعی به میزان ۷۹ درصد در ایلام، ۷۴ درصد در یزد و ۶۳ درصد در تبریز بود. جانگ و همکاران [24]، در مطالعه خود در کره جنوبی، نشان دادند که سه راهکار شامل اصلاح پوسته خارجی ساختمان، روش‌های مقرون به صرفه گرمایش و ابعاد واحدهای ساختمانی می‌تواند باعث کاهش ۷۰,۹ درصدی مصرف انرژی در سال شود.

کونگدو و همکاران [30]، از روش بهینه‌یابی شامل پیکربندی عایق‌کاری (نوع، ضخامت) و انواع پیکربندی پنجره (شیشه، فواصل جدارها، ضخامت‌ها، قاب‌ها) در دو ساختمان مهد کودک و پیش‌دبستانی موجود که سن، مصالح و سیستم‌های متفاوتی دارند در منطقه مدیترانه ارائه دادند. نتایج نشان داد که ترکیب پانل‌های الیاف کنفی با ضخامت ۶ سانتی‌متر، قاب چوبی برای پنجره‌ها، پمپ حرارتی متمرکز با منبع حرارت هوا، فن کویل برای انتشار با تهویه مکانیکی کنترل شده و سیستم فتوولتائیک متشکل از ۱۸ پنل با حداکثر توان ۴/۵ کیلووات و بازدهی ۱۷ درصد، به میزان ۸۵ درصد مصرف انرژی اولیه و ۸۲ تا ۸۳ درصد انتشار گازها را در هر ساختمان کاهش می‌دهد.

گوپتا و دب نشان دادند که عایق‌کاری پوشش ساختمان بیشترین تأثیر را در صرفه‌جویی انرژی دارد. متغیرهای جهت ساختمان و جرم حرارتی مصالح ساختمانی کمترین تأثیر را بر مصرف کل انرژی دارند. همچنین با ترکیب همه متغیرها و تهویه مناسب، یک ساختمان می‌تواند ۳۵ درصد انرژی سالانه و در برخی موارد تا ۶۰ درصد صرفه‌جویی کند [31].

کاتافیگیتو و همکاران [32]، در تحقیقی، جزئیات اجرایی شیوه‌های معمول و مصرف انرژی به روش شبیه‌سازی را در ساختمان دبیرستان‌های سه منطقه آب و هوایی، ساحلی، داخلی و کوهستانی کشور قبرس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها شش سناریوی بهینه‌سازی (افزودن پلی استایرن اکسترود شده ۵ سانتی‌متری روی سقف، افزودن پلی استایرن اکسترود شده ۵ سانتی‌متری بر روی دیوارهای پوسته خارجی و سقف، تعویض پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره، کاهش تهویه مطبوع، افزایش راندمان سیستم گرمایش و سرمایش، نصب سلول‌های خورشیدی در پشت بام ساختمان) را تحلیل کردند و نتایج نشان داد، افزودن

پلی استایرن اکسترود شده ۵ سانتی‌متری روی سقف ۱۶/۵ درصد، هم‌زمان روی دیوارها و سقف ۳۱/۹ درصد، تعویض پنجره‌های تک‌جداره با دوجداره ۳/۶ درصد و افزایش راندمان سیستم گرمایش و سرمایش ۲۳/۵درصد باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود.

الویتیشی و همکاران [33]، تأثیر عایق حرارتی، نسبت پنجره به دیوار و ترکیبی از این عوامل را بر ساختمان مدرسه‌ای در شهر طائف عربستان سعودی با آب و هوایی گرم، با استفاده از برداشت‌های میدانی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که ترکیبی از عایق حرارتی همراه با به حداقل رساندن نسبت پنجره به دیوار در ساختمان‌های موجود در مناطق گرم و خشک مورد نیاز است. عایق حرارتی باید در لایه بیرونی دیوارهای خارجی و به ویژه در کلاس‌های رو به جنوب و مرتبط با جنوب از جمله جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی اعمال شود. نماهای شمالی به دلیل به حداقل رساندن هزینه‌های اصلاح باقی می‌مانند علاوه بر این، توصیه شد که نسبت پنجره به دیوار نباید برای نمای ساختمان‌های شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی به ترتیب از ۳۵٪، ۲۵٪ و ۲۰٪ تجاوز کند.

جی هان پارک و همکاران [34]، در تحقیق خود به بررسی یک ساختمان آموزشی هنرستان چهار طبقه با مساحت ۳۸۸۳ مترمربع پرداختند، که با تبدیل سالن سخنرانی به سالن موسیقی و حذف پنجره‌های آن و همچنین سایه‌اندازی بر روی پوسته خارجی ساختمان و اعمال مواد تغییر فاز دهنده موجب کاهش ۴۴ درصدی مصرف انرژی و افزایش ۳۴ درصدی ساعات آسایش حرارتی شدند.

م. جرادی و همکاران [35]، بهینه‌سازی عمیق انرژی یک ساختمان اداری در دانمارک را بررسی کردند و نتایج تحقیق نشان داد که مصرف انرژی اولیه کلی ساختمان به اندازه ۱۷۶/۱۱ کیلووات ساعت بر مترمربع در بخش مصرف انرژی گرمایشی است که ۶۵ درصد آن برای گرمایش فضا و آب گرم خانگی است. بر این اساس، ۸ سناریوی پیشنهادی بهینه‌سازی عمیق انرژی شامل، مجموعه روشنایی کارآمد، حسگرهای نور روز در فضاهای باز و راهروها، عایق‌کاری سقف و دیوارهای بیرونی و کنترل نقطه تنظیم و شروع گرمایش تحلیل شد. این مجموعه بهینه‌سازی انرژی مصرف انرژی اولیه را به ۷۰/۴۴ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش داد تا ساختمان با مقررات انرژی ساختمان دانمارک مطابقت داشته باشد. همچنین از طریق نصب یک سیستم فتوولتاییک ۲۰ کیلوواتی بر روی پشت‌بام، ساختمان را در رده ساختمان کم انرژی با مصرف انرژی ۴۱/۳۹ کیلووات ساعت بر مترمربع قرارداد.

م. تحصیلدوست و همکاران [7]، در تحقیق سه مرحله‌ای شامل؛ ارزیابی اولیه عملکرد ساختمان و ارائه پیشنهادهای مقاوم‌سازی، بهینه‌سازی و اولویت‌بندی سناریوها بر اساس شبیه‌سازی انرژی و زمان بازگشت (PBT) و ارزیابی تکنیک‌های اجرا شده، به ارائه روش مقاوم‌سازی دو مدرسه معمولی ساخته شده قبل و بعد از سال ۲۰۰۰ در تهران- ایران پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هوابندی، تعویض نوع پنجره و عایق‌کاری سقف از کارآمدترین سناریوها برای بازسازی هستند. علاوه بر کاهش مصرف انرژی ۲۹/۸۷ درصدی در ساختمان قدیمی و ۳۸/۲۹ درصدی در ساختمان جدید، پس از اجرای مقاوم‌سازی در بررسی‌های پرسشنامه‌ای نیز بهبود کیفیت محیط داخلی را تأیید کرد.

راجی و همکاران [36]، سعی کردند اندازه ابعاد بهینه پنجره را برای ساختمان‌های اداری در سه اقلیم مختلف معتدل، نیمه‌گرمسیری و گرمسیری پیدا کنند. آن‌ها دریافتند که نسبت پنجره به دیوار بهینه، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد برای آب و هوای معتدل، بین ۳۵ تا ۴۵ درصد برای آب و هوای نیمه‌گرمسیری و بین ۳۰ تا ۴۰ درصد در آب و هوای گرمسیری می‌باشد. در آب و هوای گرم و خشک که آسمان صاف و تشعشعات خورشیدی شدید است، جدارهای بزرگ می‌توانند نور روز را بیشتر کنند اما بار سرمایشی را افزایش می‌دهند. همچنین ال دیب [37]، اظهار داشت که نسبت پنجره به دیوار بهینه باید بین ۸ تا ۱۵ درصد در ساختمان‌های مسکونی مصر باشد.

م.طاهباز و همکاران [38]، در پژوهشی به بررسی هم‌زمان درصد سطوح شفاف نما و جهت‌گیری بنا بر میزان مصرف انرژی مدارس در اقلیم معتدل و مرطوب ایران پرداختند، نشان دادند که جهت‌گیری بهینه بنا سمت جنوب است و همچنین درصد بهینه سطوح شفاف بنا بسته به جهت‌گیری می‌تواند ۴۰ تا ۵۵ درصد متغیر باشد.

با توجه به مطالعات قبلی، عایق‌بندی تمامی پوشش‌ها و پوشش کم گسیل پنجره‌های موجود [44-39]، سیستم سایه‌بان متحرک خارجی، طراحی و نصب سیستم مدیریت انرژی از راه

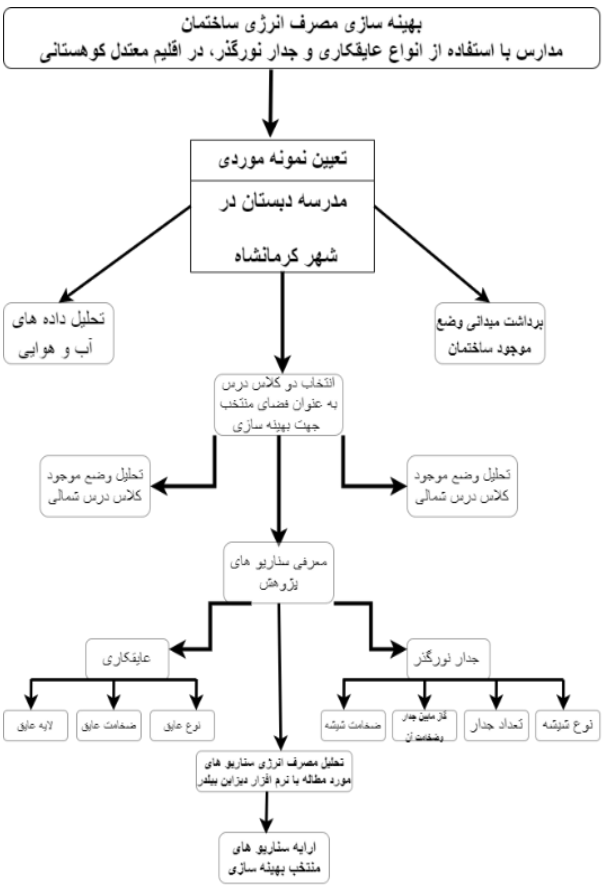
دور [42]، جایگزینی سیستم تهویه مکانیکی موجود با سیستم جدید تهویه طبیعی طراحی شده [45] به عنوان روش‌های مقاوم سازی انرژی مؤثر ذکر شده است از ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش تقاضای انرژی اولیه سالانه را در شرایط مختلف آب و هوایی ممکن کند.

با توجه به پیشینه پژوهش، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که سازمان‌های بین‌المللی، محققان و سیاستمداران کشورها درصدد بهینه‌سازی مصرف انرژی‌بخش ساختمان‌های موجود با سن زیاد بدون تخریب آن هستند. مطالعات انجام‌شده همگی نشان‌دهنده اهمیت این موضوع هستند و راهکارهای متنوعی نیز ارائه کرده‌اند.این تحقیق می‌تواند این سؤال را که «راهبردهای غیر فعال بهینه‌سازی پوسته خارجی ساختمان تا چه میزان می‌تواند در مصرف انرژی ساختمان مدارس موجود با عمر بیش از سی سال تأثیر مثبت و قابل‌توجهی داشته باشد؟» پاسخ دهد.

همچنین در مطالعات محدودی به پیکربندی انواع تنظیمات عایق‌کاری و جدار نور گذر با توجه به سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن پرداخته شده است. در این تحقیق به معیار بازگشت سرمایه بهینه‌سازی انرژی پرداخته شده است که مطالعه خاصی با این رویکرد در ایران و اقلیم‌های مرتبط با آن انجام نشده است. همچنین مطالعات بر روی عایق‌های پسماند کشاورزی بسیار محدود می‌باشد که در این تحقیق به بررسی رفتار حرارتی عایق پسماند کشاورزی نیز پرداخته شده است.

روش‌شناسی تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش مدل‌سازی و شبیه‌سازی و استفاده از برداشت‌های میدانی است. هدف این پژوهش دستیابی به مصرف انرژی کارآمد با استفاده از بهینه‌سازی انرژی در ساختمان موجود یک دبستان در اقلیم شهر کرمانشاه است. در راستای رسیدن به هدف پژوهش به شناخت رفتار حرارتی و شرایط آسایش در ساختمان مرجع و سپس ارائه بهینه‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر(Design Builder) نسخه ۶/۱ پرداخته شد. مراحل و فرایند انجام این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. در ابتدا نمونه موردی انتخاب شده و با بازدیدهای میدانی اطلاعات فنی ساختمان برداشت شد و سپس به تحلیل وضع موجود ساختمان پرداخته و دو کلاس درس به عنوان فضای منتخب، جهت بهینه‌سازی انرژی مصرفی به وسیله نرم‌افزار دیزاین بیلدر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی اعم از عایق‌کاری حرارتی در انواع پیکربندی‌ها شامل: نوع عایق، ضخامت عایق، موقعیت عایق در لایه‌بندی و همچنین پیکربندی جدار نور گذر در انواع ضخامت شیشه، گازهای مابین جداره، نوع شیشه، تعداد جدار پرداخته شده است.



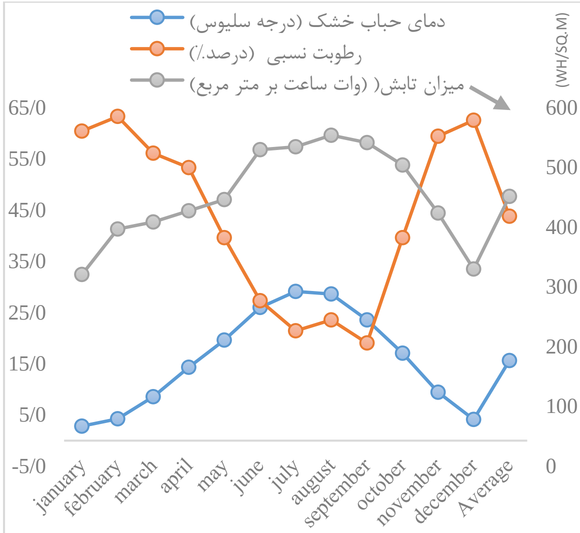
شکل ۱ فرایند انجام پژوهش

اقلیم و مکان مورد مطالعه

طبق سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن (Köppen-Geiger)، اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم، از نوع Csa معمولا میان عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه تا ۴۵ درجه دیده می‌شود که از ویژگی‌های آن میانگین دمای بیشتر از ۱۰ درجه سلسیوس در گرم‌ترین ماه سال است [46]. آب و هوای معتدل «Csa» با تابستان‌های خشک و بسیار گرم بر بخش وسیعی از مناطق کوهستانی البرز در شمال و زاگرس در غرب کشور را در بر گرفته

است [47].

با توجه به این طبقه‌بندی، مکان مورد مطالعه، شهر کرمانشاه – ایران، با معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم با موقعیت جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۰۵ متر از سطح دریا است. مطابق شکل (۲) که میانگین دمای هوای ماهانه، میزان تابش و رطوبت نسبی مکان مورد مطالعه را نشان می‌دهد، میانگین دمای هوای ماهانه ۱۵/۶۳ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت نسبی ۴۳/۸ درصد و میانگین میزان تابش خورشیدی ۴۵۱/۵ وات ساعت بر مترمربع می‌باشد. همچنین میانگین سرعت باد در این اقلیم ۲/۴۸ متر بر ثانیه است.



شکل ۲ میانگین دمای هوای ماهانه، میزان تابش و رطوبت نسبی شهر کرمانشاه

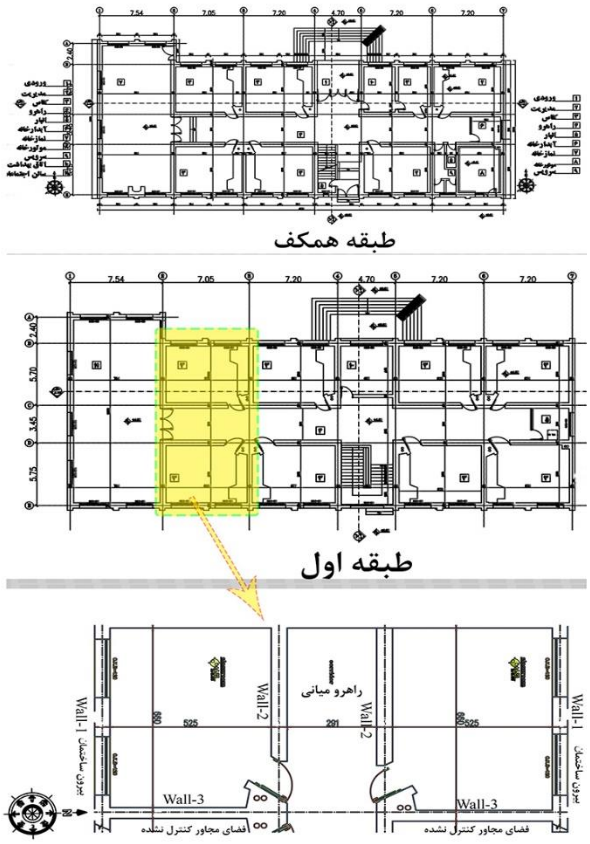
ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد مطالعه در این پژوهش مدرسه‌ای دو طبقه ۱۴ کلاسه با نام احسان (شکل ۳)، واقع در شهر کرمانشاه- ایران به مساحت ۱۳۱۰ مترمربع زیربنا می‌باشد. پلان‌های این ساختمان در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس برداشت‌های میدانی و به عمل آمده از ساختمان و همچنین با استفاده از نقشه‌های ازبیلت تهیه شده از سازمان نوسازی مدارس استان کرمانشاه، مشخصات ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در این ساختمان در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

در شبیه‌سازی ساختمان موجود دو کلاس درس مطابق شکل (۴) به ابعاد ۶/۶*۵/۲ متر به‌عنوان فضای نمونه و نماینده فضاهای دیگر مورد بررسی قرار گرفتند، یکی از کلاس‌ها در جبهه جنوبی ساختمان و کلاس دیگر در جبهه شمالی ساختمان قرار دارد. همچنین فضاهای مجاور کلاس‌های درس به عنوان فضای کنترل نشده، جهت ارائه دقیق‌تر نتایج مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت.



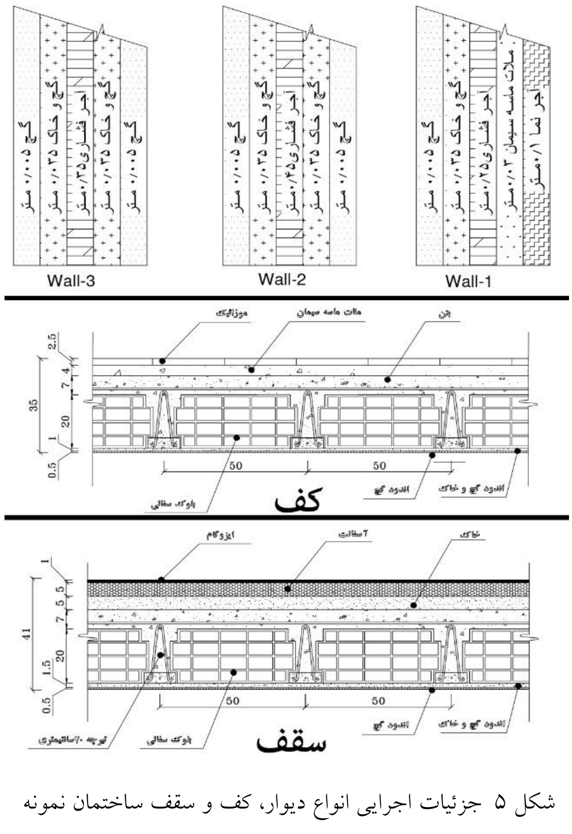
شکل ۳ (الف) نمای مدل‌سازی شده ساختمان در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، (ب) وضع موجود ساختمان مدرسه احسان



شکل ۴ بالا: پلان طبقه هم‌کف و اول ساختمان مدرسه احسان / پایین: فضای منتخب در دو کلاس درس شمالی و جنوبی

جدول ۱ مشخصات ترموفیزیکی مصالح استفاده شده در ساختمان

مشخصات مصالح ساختمان مرجع				
متریال	ضخامت	هدایت حرارتی	چگالی	گرمای ویژه
	m	w/m.k	kg/m^3	j/kg-k
آجرنما	0.1	0.84	1700	800
ملات ماسه سیمان	0.03	0.72	1860	840
آجر فشاری	0.22	0.72	1920	840
ملات گچ و خاک	0.035	1.1	1680	840
گچ نازک‌کاری	0.005	0.57	1000	1000
ایزوگام	0.004	0.23	1100	1000
آسفالت	0.05	0.7	2100	1000
خاک بر پایه شن	0.05	0.52	2050	180
بتن هوادهی	0.07	0.16	500	840
کرسی چینی سنگی	0.2	1.4	2200	840
موزاییک کف	0.025	1.35	1890	880
مشخصات بازشوهای ساختمان مرجع				
نوع شیشه	تعداد جدار	ضخامت شیشه	پروفیل قاب	هدایت حرارتی
ساده	۱	۳ میلی‌متر	فولادی	۰/۹



شکل ۵ جزئیات اجرایی انواع دیوار، کف و سقف ساختمان نمونه

مطابق با شکل (۵) دیوار کلاس‌های مورد مطالعه از سه تیپ با نام wall1_3 تشکیل شده‌اند. wall1 دیوار های خارجی، wall2 دیوارهای غربی و دیوارهای مجاور راهرو و wall3 دیوارهای شرقی که در جدول (۱) همراه با مشخصات ترموفیزیکی سقف و کف نشان داده شده است

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

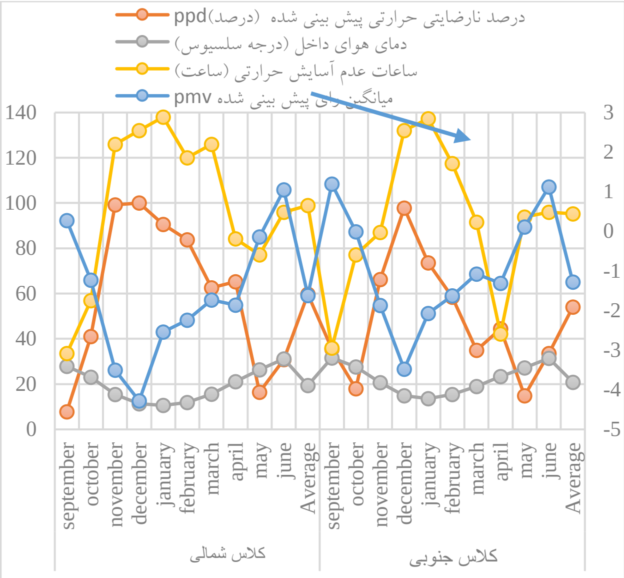
در این مطالعه داده‌های آب و هوایی از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی و نرم‌افزار (Climate consultant) تهیه شد و شبیه‌سازی ساختمان با استفاده از نقشه‌های ازبیلت و استخراج از نرم‌افزار اتوکد در نرم‌افزار دیزاین بیلدر نسخه ۶/۱ با استفاده از فایل Epw وارد شد. مصالح و جزئیات استفاده شده در ساختمان از سازمان نوسازی مدارس استان کرمانشاه و بازدیدهای میدانی تهیه گردید.

در ساختمان مرجع، دوره فعالیت مدرسه از دهم شهریور ماه تا دهم تیر ماه و برنامه ساعتی فعالیت ساختمان از ساعت ۸ تا ۱۴ می‌باشد که دو روز تعطیلات در هر هفته نیز لحاظ شده است، همچنین نرخ متابولیک فعالیت افراد خردسال ۰/۷۵ و ضریب لباس ساکنان نیز در زمستان ۱/۰۰ و در تابستان ۰/۵۰ در نظر گرفته شده است. دمای نقطه شروع گرمایش ۲۰ درجه سلسیوس و دمای نقطه شروع سرمایش برابر ۲۸ درجه سلسیوس مطابق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران است و همچنین دمای شروع تهویه طبیعی نیز ۲۴ درجه سلسیوس در نظر گرفته است که مطابق با کتابخانه انرژی پلاس است.

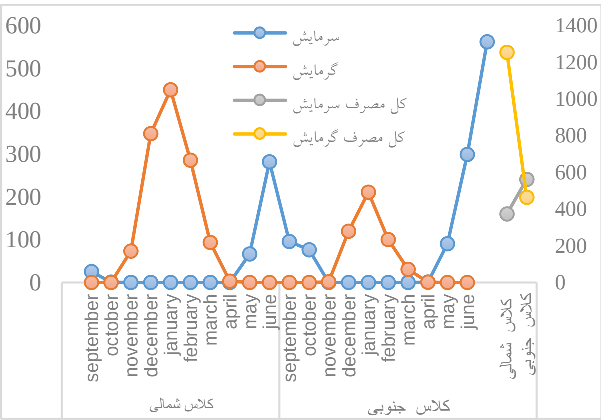
در کلاس‌های عمومی این ساختمان هیچ گونه کامپیوتر و تجهیزات اداری برقی وجود ندارد، بر همین مبنا در این مطالعه از چگالی و مصرف انرژی کامپیوتر و تجهیزات اداری در تمام فضا صرف نظر شده است. روشنایی مصنوعی در این ساختمان نیز با توجه به برنامه زمانی آن خاموش فرض شده است. سیستم سرمایش ساختمان با استفاده از کولر آبی با ضریب بازدهی (Cop) ۰/۷۰ و گرمایش آن با استفاده از سیستم موتورخانه مرکزی و میزان ضریب بازدهی ۰/۸۵ می‌باشد. همچنین ضریب نشت و نفوذ هوا (infilteration)، برابر ۰/۵ تعویض هوا در ساعت (Ac/h) می‌باشد و از میزان انرژی برای آب گرم مصرفی در این مطالعه چشم‌پوشی شده است.

رفتار حرارتی ساختمان موجود

در شبیه‌سازی کلاس‌های مورد مطالعه، به تحلیل شاخص‌های آسایش حرارتی ساختمان (شکل ۶) و میزان مصرف انرژی (شکل ۷) پرداخته شد.



شکل ۶ بررسی آسایش حرارتی در وضع موجود ساختمان



شکل ۷ میزان مصرف انرژی در فضاهای مورد مطالعه ساختمان

شکل (۶) آمار شاخص‌های آسایش حرارتی و دمای هوا در کلاس‌های شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد که شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (pmv) در طول دوره بهره‌برداری (دهم شهریور ماه تا دهم تیر ماه)، در کلاس شمالی برابر ۱/۳۹− و در کلاس جنوبی ۰/۹۴− است. میانگین شاخص درصد نارضایتی حرارتی پیش‌بینی شده (ppd) در کلاس شمالی ۵۵/۷۷ درصد و

کلاس جنوبی ۴۸/۰۷ درصد می‌باشد. هر چند که میانگین دوره شاخص pmv در کلاس شمالی در ماه سپتامبر در محدوده آسایش قرار دارد اما مطابق با شکل و شاخص ساعات عدم آسایش حرارتی نشان می‌دهد که اکثر روزهایی که ساختمان در حال بهره‌برداری است، فضای مورد نظر در محدوده آسایش قرار ندارد و نشان‌دهنده هوای سرد فضا در کل دوره به خصوص سه ماه زمستان است. همچنین میزان ساعت عدم آسایش حرارتی در کلاس شمالی ۹۳۸ ساعت و در کلاس جنوبی ۸۳۸/۲ ساعت است.

با توجه به شکل (۷) میزان مصرف انرژی در فضاهای کلاس درس مورد نظر در جبهه شمالی و جنوبی در طول دوره بهره‌برداری بررسی شد و نشان داد که مصرف انرژی گرمایش کل دوره مذکور در کلاس درس شمالی ۱۲۵۴/۲ کیلووات ساعت و کل مصرف انرژی سرمایشی کلاس درس شمالی ۳۷۴/۲ کیلووات ساعت است. همچنین، در کلاس درس جنوبی، مصرف انرژی گرمایش کل دوره برابر با ۴۶۴/۳ کیلووات ساعت و مصرف انرژی سرمایش ۵۶۲/۴ کیلووات ساعت در کل دوره بهره‌برداری ساختمان در یکسال است.

یافته‌ها و نتیجه‌گیری

پیکربندی عایق‌کاری

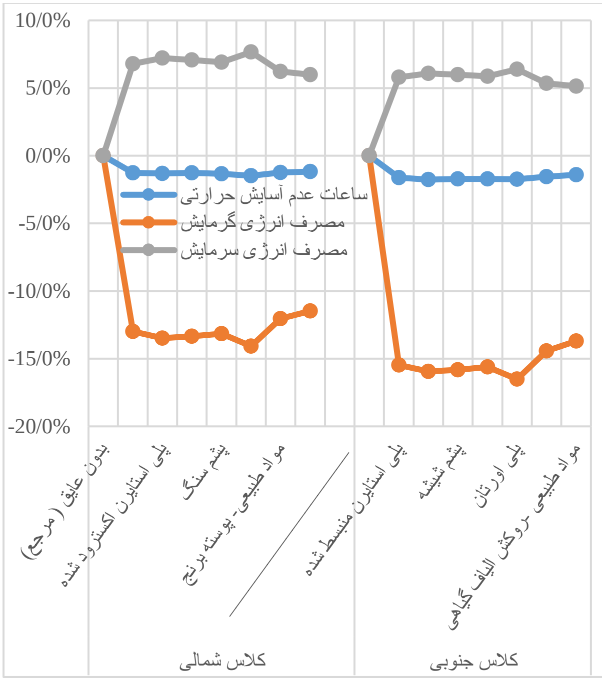
در بهینه‌سازی دو کلاس درس مورد مطالعه در مرحله اول شبیه‌سازی، به انواع عایق‌بندی حرارتی دیوار خارجی با توجه به جدول (۲) با ضخامت پیش‌فرض ۵۰ میلی‌متر و در لایه‌بندی تیپ ۱ مطابق شکل (۱۰) پرداخته شد.

نوع عایق. جدار خارجی فضای مورد نظر با ۶ نوع عایق حرارتی مختلف شامل، پلی استایرن منبسط شده (eps)، پلی استایرن اکسترود شده (xps) ، پشم شیشه، پشم سنگ، پلی یورتان، مواد طبیعی- پوسته برنج در دو جبهه شمالی و جنوبی بررسی شد که مشخصات انواع عایق‌های مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۸)، بهینه‌یابی ۶ عایق حرارتی به ضخامت ۵ سانتی‌متر، در جدار خارجی کلاس‌های درس شمالی و جنوبی شبیه‌سازی شد و نتایج نشان می‌دهد که ۶ نوع عایق حرارتی تقریبا عملکرد یکسانی داشتند. با توجه به وضع موجود مصرف انرژی ساختمان در شکل (۷)، افزودن عایق پلی اورتان به جدار خارجی کلاس درس شمالی، منجر به کاهش ۱۴/۰۷ درصدی (۱۷۶,۵ کیلووات ساعت) مصرف انرژی گرمایشی در طول دوره و کاهش ۱/۵ درصدی ساعات عدم آسایش شده است. همچنین با توجه به پدیده آنتی اینزولیشن مصرف سرمایش ساختمان، ۷/۶۶ درصد (۲۸/۷ کیلووات ساعت) افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در کلاس درس شمالی، عایق پلی اورتان مناسب‌ترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی گرمایش، مواد طبیعی با روکش الیافی گیاهان مناسب‌ترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی سرمایش داشته است. در کلاس درس جنوبی نیز عایق پلی اورتان با ۱۶/۵۱ درصد (۷۶/۷ کیلووات ساعت) مناسب‌ترین عملکرد را در بخش مصرف انرژی گرمایش و مواد طبیعی- روکش الیاف گیاهی با ۵/۱۴ درصد (۲۸/۹ کیلووات ساعت) مناسب‌ترین عملکرد در بخش مصرف انرژی سرمایشی را دارد. همچنین عایق پلی اورتان با ضخامت ۵ سانتی‌متر در کل دوره شبیه‌سازی در کلاس درس شمالی با احتساب پدیده آنتی اینزولیشن به میزان ۹ درصد (۱۴۷/۸ کیلووات ساعت) کاهش مصرف انرژی سرمایش و گرمایش داشته است. این میزان در کلاس درس جنوبی برابر با ۴ درصد (۴۰/۷ کیلووات ساعت) است. البته با توجه به اینکه کل مصرف انرژی سرمایش در مدل بدون عایق در کلاس شمالی ۳۷۵ کیلووات ساعت و در کلاس جنوبی ۵۶۲ کیلووات ساعت است می‌توان از افزایش مصرف انرژی به دلیل پدیده آنتی اینزولیشن چشم‌پوشی کرد. عملکرد عایق‌های دیگر، در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات انواع عایق‌های مورد مطالعه

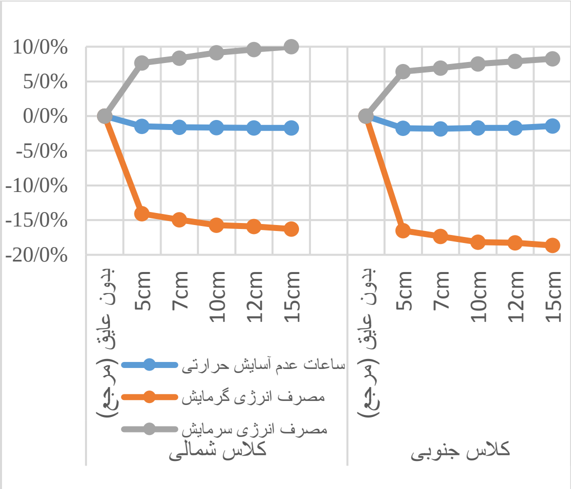
مشخصات ترموفیزیکی عایق‌ها			
نوع عایق	هدایت حرارتی	گرمای ویژه	چگالی
	w/m.k	J/kg-k	kg/m3
پلی استایرن منبسط‌شده (eps)	0.040	1400	15
پلی استایرن اکسترود شده (xps)	0.034	1400	35
پشم شیشه	0.036	840	20
پشم سنگ	0.038	840	40
پلی یورتان	0.028	1470	30
مواد طبیعی- پوسته برنج	0.051	1000	120



شکل ۸ تأثیر انواع عایق‌ها با ضخامت ۵ سانتی متر بر مصرف انرژی فضاهای مورد مطالعه

ضخامت عایق. عایق پلی اورتان موجود در بازار از نوع پاششی است و اجرا کننده می‌تواند در ضخامت‌های متغیری عملیات پاشش عایق را اجرا کند، و در این مطالعه ضخامت‌های ۵–۷–۱۰–۱۲–۱۵ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد. از این رو عایق پلی اورتان که در بخش قبلی از انواع عایق به عنوان مناسب‌ترین عایق شناخته شد. با توجه به شکل (۹) نتایج نشان داد که عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر نسبت به ضخامت ۵ سانتی‌متری به میزان ۲/۵۷ درصد کاهش بیشتری در گرمایش کلاس درس داشته است و نسبت به مدل مرجع (بدون عایق)، در کلاس درس شمالی منجر به کاهش ۱۶/۲۸ درصد (۲۰۴/۱ کیلووات ساعت) مصرف انرژی شده است، همچنین در بخش سرمایش عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر ۱۰ درصد (۳۷/۴۱ کیلووات ساعت) نسبت به مدل مرجع افزایش مصرف انرژی داشته است، علاوه بر این عایق پلی اورتان در مجموع سرمایش و گرمایش کلاس درس شمالی موجب کاهش ۱۰/۲۴ درصدی (۱۶۶/۷۱ کیلووات ساعت) شده است. همچنین عایق پلی اورتان ۱۵ سانتی‌متری موجب کاهش ساعات عدم آسایش به میزان ۱/۷۲ درصد در کلاس درس شمالی شده است.

با توجه به شکل (۹)، در کلاس درس جنوبی نیز ضخامت‌های ۵–۷–۱۰–۱۲–۱۵ شبیه‌سازی شد که نتایج آن، کاهش مصرف انرژی گرمایش به ترتیب به میزان ۱۶٫۵۱، ۱۷٫۳۶، ۱۸٫۱۶، ۱۸٫۲۷، ۱۸٫۶۵ درصد را نشان می‌دهد و در مصرف انرژی سرمایش با ایجاد پدید آنتی اینزولیشن به ترتیب به میزان ۶٫۴، ۶٫۹۱، ۷٫۵۳، ۷٫۹۱، ۸٫۲۵ درصد افزایش مصرف انرژی داشته است.



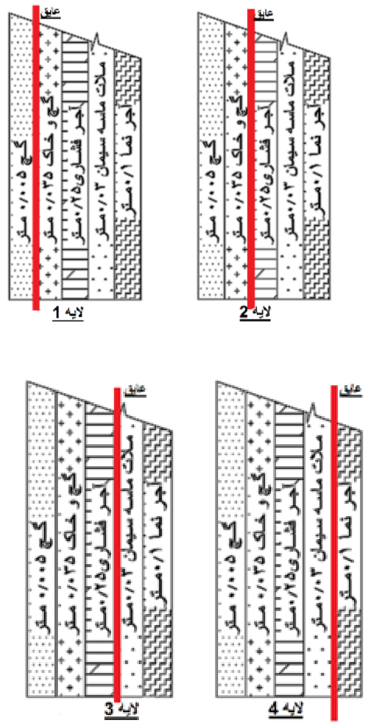
شکل ۹ تأثیر ضخامت عایق پلی اورتان بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی

با توجه به مطالب گفته شده در بخش ضخامت عایق و با توجه به اختلاف ناچیز مصرف انرژی و آسایش حرارتی مابین ضخامت ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری و اختلاف ۱/۵ برابری در هزینه افزایش ضخامت و همچنین اشغال کردن فضای معماری، می‌توان عایق پلی اورتان را به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان ضخامت بهینه در نظر گرفت.

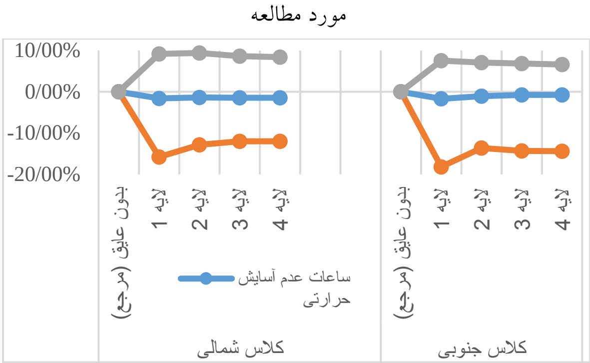
اثر موقعیت عایق در دیوار. موقعیت عایق در لایه‌های مختلف دیوار می‌تواند تأثیر به‌سزایی در عملکرد عایق‌کاری حرارتی داشته باشد، به همین دلیل در این تحقیق اثر موقعیت عایق پلی اورتان ۱۰ سانتی‌متری در راستای ادامه مباحث قبلی در ۴ الگوی لایه‌بندی عناصر بررسی شده است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی نشان داد که موقعیت عایق با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در لایه پشت گچ نازک‌کاری (لایه ۱) مناسب‌ترین عملکرد را داشته است به صورتی که مصرف انرژی سرمایش و گرمایش همان نتایج بخش قبلی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متری است. در بخش‌های قبلی عایق پلی اورتان نیز در

موقعیت پشت گچ داخلی (لایه ۱) قرار داشت و در ادامه در ۳ موقعیت دیگر سنجیده شد که شامل لایه ۲ و لایه ۳ و لایه ۴ است.



شکل ۱۰ موقعیت عایق در لایه‌بندی‌های مختلف دیوار خارجی فضاهای



شکل ۱۱ تأثیر موقعیت عایق پلی اورتان ۱۰ سانتی‌متری در مصرف انرژی و آسایش حرارتی

پیکربندی جدار نور گذر

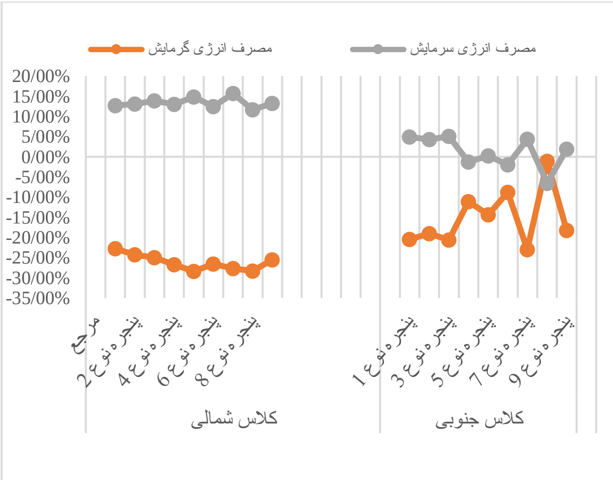
در راستای کاهش میزان انتقال حرارتی از جدار نور گذر و همچنین کاهش اتلاف حرارتی آن که به نسبت بیشتر از حد استاندارد معمول بوده است، ۹ نوع پیکربندی جداره نورگذر مورد بررسی قرار گرفت. که در جدول (۳) نشان داده شده است و ضخامت شیشه‌ها، تعداد جداره، گاز میانی جدارها، ضخامت گاز مابین جدارها در این ۹ نوع پیکربندی متفاوت است.

جدول ۳ پیکربندی‌های مختلف جدار نور گذر

پیکربندی‌های مختلف جدار نورگذر							
ضخامت گاز جدار میانی (میلی‌متر)	گاز جدار میانی	ضخامت شیشه (میلی‌متر)	ضریب انتقال حرارت (u-value.W (M2.K\	ضریب (SHGC) شیشه	نوع شیشه	تعداد جدار	
*	*	3	5.894	0.861	معمولی	1	مرجع
6	هوا	3	3.159	0.762	معمولی	2	پنجره نوع1
13	هوا	6	2.665	0.703	معمولی	2	پنجره نوع2
13	آرگون	6	2.511	0.704	معمولی	2	پنجره نوع3
13	هوا	3	1.786	0.598	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع4
13	آرگون	3	1.512	0.597	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع5
13	هوا	6	1.761	0.568	کم گسیل در جداره داخلی	2	پنجره نوع6
13	هوا	3	1.757	0.684	معمولی	3	پنجره نوع7
13	هوا	3	0.982	0.474	کم گسیل در جداره خارجی	3	پنجره نوع8
6	هوا	3	2.178	0.682	معمولی	3	پنجره نوع9

با توجه به شکل (۱۲) و با شبیه‌سازی ۹ نوع پیکربندی مختلف در جدار نور گذر نتایج نشان داد که در کلاس درس شمالی مصرف انرژی گرمایشی در کل دوره با پنجره نوع ۵ (۲ جداره با شیشه کم گسیل در جدار خارجی و ۱۳ میلی‌متر گاز آرگون و ۳ میلی‌متر ضخامت شیشه) به میزان ۲۸/۴ درصد کاهش نسبت به مدل مرجع داشته است همچنین پنجره نوع ۸ نیز ۲۸/۳۵ درصد و پنجره نوع ۷ به میزان ۲۷/۷۰ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایش داشته است. همچنین میزان مصرف انرژی سرمایش به نسبت مدل مرجع افزایش داشته که نتیجه پدیده آنتی اینزولیشن می‌باشد.

در کلاس جنوبی نتایج نسبت به کلاس شمالی متفاوت هستند، به این صورت که پنجره نوع ۷ به میزان ۲۳/۰۴ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایشی داشته است و همچنین پنجره نوع ۳ به میزان ۲۰/۶۲ درصد و پنجره نوع ۱ به میزان ۲۰/۴۸ درصد و پنجره نوع ۲ به میزان ۱۹,۰۲ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایشی داشته است. میزان افزایش انرژی سرمایش ساختمان بسیار کمتر نسبت به کلاس شمالی بوده است.



شکل ۱۲ تأثیر پیکربندی مختلف جدار نور گذر بر مصرف انرژی ساختمان

تخمین زمان بازگشت سرمایه

دوره بازگشت سرمایه یک معیار مالی پرکاربرد برای اندازه‌گیری احتمال بازدهی از یک سرمایه‌گذاری است. هزینه و زمان بازگشت سرمایه را با استفاده از معیار بازگشت سرمایه در طرح‌های بهینه‌سازی انرژی می‌توان میزان هزینه پروژه‌های بهینه‌سازی انجام شده را با توجه به میزان کاهش مصرف انرژی در سال‌های بهره‌برداری ساختمان محاسبه کرد. معیار یاد شده نشان‌دهنده این است که تا چه مقدار و در چه مدت هزینه پروژه (سرمایه‌گذاری) به نسبت صرفه‌جویی در مصرف انرژی به بهره‌بردار باز می‌گردد. در محاسبه هزینه عایق‌کاری ساختمان در شهریور ماه سال ۱۴۰۲ استعلام عایق‌های مد نظر از شرکت‌های تولید کننده اخذ گردید. همچنین قیمت انرژی مصرفی بر پایه تعرفه انرژی وزارت نیرو در سال ۱۴۰۲ به ازای هر کیلووات ساعت ۱۷۷۰ ریال است. بر این مبنا تمام عایق‌ها با ضخامت ۵ سانتی‌متر در معیار مدت زمان بازگشت سرمایه محاسبه شد.

با توجه به جدول (۴) نتایج نشان داد که هر چند عایق پلی اورتان با اختلاف کم نسبت به عایق‌های دیگر عملکرد بهتری داشته است اما زمان بازگشت سرمایه آن با توجه به گران بودن عایق در بازار فروش به ۱۵۸/۱۴ سال می‌رسد. همچنین عایق پشم شیشه با توجه به اینکه نتایج عملکرد نزدیکی به عایق پلی اورتان دارد و نیز قیمت مناسب آن قیمت مناسب آن در بازار فروش، زمان بازگشت سرمایه آن ۲۷/۹۲ سال می‌باشد. عایق‌های پلی استایرن منبسط شده و پلی استایرن اکسترود شده و عایق پشم سنگ زمان بازگشت سرمایه به ترتیب ۷۲/۱۸ –۶۷/۶۴– ۶۰/۴۴ سال دارند. با توجه به نتایج استباط می‌شود که بالا بودن مدت بازگشت سرمایه به دلیل یارانه‌های موجود انرژی در کشور ایران است. همچنین عایق‌های تولید شده از ساقه برنج و گیاهان به دلیل بومی‌سازی نشدن و عدم وجود بازار فروش در ایران از معیار مدت بازگشت سرمایه مثتسنی شدند.

در محاسبه بازگشت سرمایه بهینه‌سازی جدار نورگذر با توجه به اینکه بهینه‌سازی با استفاده از شیشه‌های هوشمند و با تکنولوژی جدید انجام شده است، این نوع شیشه‌ها در داخل کشور ایران تولید نشده و بازار فروش ندارند، به همین دلیل در محاسبه بازگشت سرمایه لحاظ نشده‌اند.

جدول ۴ محاسبه هزینه و زمان بازگشت سرمایه عایق‌کاری پوسته ساختمان

نوع عایق	ضخامت بهینه	قیمت واحد (ریال/متر مکعب)	هزینه کل بهینه‌سازی (ریال)	میزان تأثیر در بهینه‌سازی گرمایش (گاز مصرفی) در دو کلاس درس در هر سال (کیلووات ساعت)	مقدار صرفه جویی سالانه (ریال)	بازگشت سرمایه (سال)
پلی اورتان با دانسیته ($30kg/m^3$)	۵	۷۵/۰۰۰/۰۰۰	۷۰/۸۷۵/۰۰۰	۲۵۳/۲	۴۴۸/۱۶۴	۱۵۸/۱۴
پشم سنگ	۵	۲۵/۴۰۰/۰۰۰	۲۴/۰۰۳/۰۰۰	۲۳۷/۴	۴۲۰/۱۹۸	۶۰/۴۴
پلی استایرن منبسط شده	۵	۳۰/۰۰۰/۰۰۰	۲۸/۳۵۰/۰۰۰	۲۳۴/۸	۴۱۵/۵۹۶	۷۲/۱۸
پلی استایرن اکسترود شده	۵	۲۹/۰۰۰/۰۰۰	۲۷/۴۰۵/۰۰۰	۲۴۲/۲	۴۲۸/۶۹۴	۶۷/۶۴
پشم شیشه	۵	۱۲/۶۰۰/۰۰۰	۱۱/۹۰۷/۰۰۰	۲۴۰/۹	۴۲۶/۳۹۳	۲۷/۹۲
مواد طبیعی– پوسته برنج	۵	*	*	۲۱۸	*	*
مواد طبیعی– روکش الیاف گیاهی	۵	*	*	۲۰۷/۵	*	*
نرخ و تعرفه انرژی در اوج مصرف (کیلووات ساعت/ریال): ۱۷۷۰						
مقدار مورد مصرف در بهینه‌ترین حالت در دو کلاس درس (مترمکعب): ۰/۹۴۵						

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان مدارس موجود با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی انرژی اعم از پیکربندی‌های عایق‌کاری و پیکربندی‌های جدار نور گذر در یک ساختمان آموزشی دو طبقه واقع در شهر کرمانشاه، با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر به روش مدل‌سازی، شبیه‌سازی و برداشت‌های میدانی انجام شده است. همچنین بازگشت سرمایه بهینه‌سازی انرژی نیز محاسبه شده است. متغیرهای بررسی شده در این پژوهش شامل حالت‌های بهینه نوع عایق، ضخامت عایق، موقعیت عایق در لایه‌بندی، نوع شیشه، ضخامت شیشه، تعداد جدارهای شیشه، گازهای مابین جدارها و ضخامت آن‌ها است.

نتایج این مطالعه نشان داد که میزان مصرف انرژی سرمایش و گرمایش، با توجه به تحلیل‌های انجام شده در هر مترمربع فضای کلاس درس در جبهه شمالی در حدود ۴۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در طول یک سال تحصیلی است. همچنین کلاس درس جنوبی نیز مصرف انرژی گرمایش و سرمایش معادل ۳۰ کیلووات ساعت در مترمربع در یک سال تحصیلی را دارد. در فرایند بهینه‌سازی مصرف انرژی دو کلاس درس مورد مطالعه با اعمال ۶ نوع عایق مختلف در ضخامت‌های ۵–۷–۱۰–۱۲–۱۵ سانتی‌متر و ۴ الگوی لایه‌بندی عناصر بررسی شد. نتایج نشان داد، عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در داخلی‌ترین لایه (پشت گچ نازک‌کاری) مناسب‌ترین عملکرد را با میزان ۱۵,۷۴ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایش در کلاس شمالی و ۱۸,۱۶ درصد کاهش مصرف انرژی گرمایش در کلاس جنوبی داشته است. در ادامه مطالعه همچنین ۹ نوع پیکربندی مختلف در جدارهای نور گذر کلاس درس شمالی شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که در کلاس درس شمالی، پنجره دوجداره با شیشه کم گسیل در لایه داخلی و با ۳ میلی‌متر ضخامت شیشه و ۱۳ میلی‌متر ضخامت گاز آرگون در جدار میانی (پنجره نوع ۵) منجر به کاهش ۲۸/۴ درصدی مصرف انرژی گرمایش شده است، همچنین پنجره سه جداره با شیشه معمولی و ضخامت ۳ میلی‌متر شیشه و ۱۳ میلی‌متر هوا در هر ۲ جداره میانی (پنجره نوع ۷)، عملکرد نزدیکی با سناریوی قبلی داشته است، به همین ترتیب در کلاس درس جنوبی نیز پنجره سه جداره با شیشه معمولی و ۳ میلی‌متر ضخامت شیشه، ۱۳ میلی‌متر ضخامت هوای مابین جدارها (پنجره نوع ۷) باعث کاهش ۲۳/۰۴ درصدی مصرف انرژی گرمایش شده است. در نتیجه بهترین راه‌حل‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان مورد مطالعه استفاده از عایق پلی اورتان با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در لایه‌بندی شماره ۱ می‌باشد و همچنین پنجره نوع ۵ در کلاس درس شمالی و پنجره نوع ۷ در کلاس درس جنوبی بهترین عملکرد را داشته است.

با توجه به سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن اقلیم معتدل با

تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Csa) به میزان ۱۷/۰۳ درصد از وسعت ایران را اشغال کرده است [47]. بر همین مبنا تا حدودی می‌توان نتایج این مطالعه را به شهرهای دیگر که تابع اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم (Csa) هستند تعمیم داد.

با توجه به مطالب و نتایج به دست آمده از این تحقیق، مشخص شد که بعد از عایقکاری و بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌های موجود، مقدار ناچیزی مصرف انرژی سرمایشی ساختمان افزایش پیدا می‌کند که به پدیده آنتی اینزولیشن شهرت دارد. از این رو پیشنهاد می‌شود که تحقیقات گسترده‌تری در حوزه جلوگیری و دفع این افزایش مصرف انرژی سرمایشی، در راستای اجرای کامل و بی‌نقص بهینه‌سازی انرژی ساختمان انجام شود.

واژه نامه

ارزیابی‌های پس از بهره‌برداری	POE
کشورهای غیر عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی	OCDE
آژانس بین‌المللی انرژی	IEA
کاهش انعطاف جسمی	ductility
پیکربندی	configuration
زمان بازگشت	PBT
سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن	Köppen‑ Geiger
آب و هوای معتدل	Csa
نفوذ هوا	infilteration
شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده	pmv
شاخص درصد نارضایتی حرارتی پیش‌بینی شده	ppd
پلی استایرن منبسط شده	eps
پلی استایرن اکسترود شده	xps

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] E. Solgi, S. Memarian, and G. Nemati Moud, “Financial viability of PCMs in countries with low energy cost: A case study of different climates in Iran,” *Energy and Buildings*, vol. 173, pp. 128-137, 2018. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.028

[2] J. Han, J. Miao, Y. Shi, Z.Miao, “Can the semi-urbanization of population promote or inhibit the improvement of energy efficiency in China?” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26 ,pp. 921-932, (2021).

[3] E. Rodrigues, N. Azimi Fereidani, M. S. Fernandes, and A. R. Gaspar, “Climate change and ideal thermal transmittance of residential buildings in Iran,” *Journal of Building Engineering*, vol. 74, pp. 106919, (2023).

[4] S. Saihi, M. Faizi, and F. M. Saradj, “Prioritization of Façade Retrofit Measures to Achieve Energy Efficiency in Existing Office Buildings in Tehran,” *Manzar*, vol. 14, no. 59, pp. 30-39, (2022). (In Persian) https://doi.org/10.22034/manzar.2021.312873.2163

[5]. A. Khani, M. Khakzand, M. Faizi, “Multi-objective optimization for energy consumption, visual and thermal comfort performance of educational building (case study: Qeshm Island, Iran),” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, p 102872, (2022).

[6] S. Zahiri, H. Altan, “Improving energy efficiency of school buildings during winter season using passive design strategies,” *Sust. Build*, vol. 5, p. 1, (2020).

[7] M. Tahsildoost, Z.S. Zomorodian, “Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran,” *Energy and Buildings*, vol. 104, p. 65-72, (2015).

[8] Q. Al-Yasiri, M. Szabó, “Experimental study of PCM-enhanced building envelope towards energy-saving and

decarbonisation in a severe hot climate," *Energy and Buildings*, vol. 279, p. 112680, (2023).

[9] F. Fazlikhani, H. Goudarzi, E. Solgi, "Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates," *Energy Conversion and Management*, vol. 148, p. 78-89, (2017).

[10] F. Babich, G. Torriani., J. Corona, I. Lara-Ibeas, "Comparison of indoor air quality and thermal comfort standards and variations in exceedance for school buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 71, p. 106405, (2023).

[11] M. K. Singh, R. O, Ooka, H. B. Rijal, S.Kumar, A. Kumar, S. Mahapatra, "Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward," *Energy and Buildings*, vol. 188-189, p. 149-174, (2019).

[12] A. Zhang, R. Bokel, A. V. Dobbelelsteen, Y. Sun, Q. Hunang, Q. Zhang, "Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 371-384, (2017).

[13] M. K. Singh, S. Kumar, R. Ooka, H. B. Rijal, G. Gupta, A. Kumar, "Status of thermal comfort in naturally ventilated classrooms during the summer season in the composite climate of India," *Building and Environment*, vol. 128, pp. 287-304, (2017).

[14]https://worldgbc.org/article/earth-day-why-the-quality-of-educational-environments-affects-the-quality-of-learning-inside-them/

[15] S. A. Churchill, R. Smyth, "Energy poverty and health: Panel data evidence from Australia. Energy economics," *Energy Economics*, vol. 97, p. 105219, (2021).

[16] R. Bentley, L. Daniel, Y.Li, E. Baker, A. Li, "The effect of energy poverty on mental health, cardiovascular disease and respiratory health: a longitudinal analysis," *The Lancet Regional Health–Western Pacific*, vol. 35, (2023).

[17] W. Zeiler, G. Boxem, "Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter," *Building and Environment*, vol. 44, no. 11, pp. 2308-2317, (2009).

[18] H. Zhang, K. Hewage, H. Karunathilake, H. Feng, R. Sadiq, "Research on policy strategies for implementing energy retrofits in the residential buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 103161, (2021).

[19] E. Parliament, "REPORT on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings," (2017).

[20] G. O. Canada, "Energy, Greenhouse Gas Emissions, Natural resources Canada," (2021).

[21] A. Charles, W. Maref, C.M. Ouellet-Plamondon, "Case study of the upgrade of an existing office building for low energy consumption and low carbon emissions," *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 151-160, (2019).

[22] B. P. Munoz, B. Peuportier, L. Gracia-Villa "Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach," *Building and Environment*, vol. 160, p. 106203, (2019).

[23] R. Ruparathna, K. Hewage, and R. Sadiq, "Rethinking investment planning and optimizing net zero emission buildings," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 19, no. 6, pp. 1711-1724, (2017).

[24] H. Jang, L. Jones, J. Kang, "Prioritisation of old apartment buildings for energy-efficient refurbishment based on the effects of building features on energy consumption in South Korea," *Energy and Buildings*,. vol. 96, pp. 319-328, (2015).

[25] P. Jie, F. Zhang, Z. Fang. H. Wang, Y. Zhao, “Optimizing the insulation thickness of walls and roofs of existing buildings based on primary energy consumption, global cost and pollutant emissions,” *Energy*, vol. 159, pp. 1132-1147, (2018).

[26] A. Tabadkani, S. Banihashemi, M. R. Hosseini, “Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis,” *Building Simulation*. vol. 11, no. 4, pp. 663-676, (2018).

[27] S. Ni, N. Zhu, Y. Hou, Z. Zhang, “Research on indoor thermal comfort and energy consumption of zero energy wooden structure buildings in severe cold zone,” *Journal of Building Engineering*, vol. 67, p. 105965, (2023).

[28] S. E. Sadati, N. Rahbar, H. Kargarsharifabad, “Energy assessment, economic analysis, and environmental study of an Iranian building: The effect of wall materials and climatic conditions,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 56, p. 103093, (2023).

[29] Y. Yousefi,. “Energy efficiency in educational buildings in Iran: Analysis and measures,” *in Proceedings*, (2015).

[30] Congedo, P.M.A.U.D.A.D.B.C.T.G.Z.I.E.S. and B. “Cost-Optimal Analysis for Existing School Energies, ” (2016). 9, DOI: 10.3390/en9100851.

[31] V. Gupta, C. Deb, “Envelope design for low-energy buildings in the tropics: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, pp. 113650, (2023).

[32] M. C. Katafygiotou, D. K. Serghides, “Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school,” *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 8-16, (2014).

[33] M. Alwetaishi, A. Taki, “Investigation into energy performance of a school building in a hot climate: Optimum of window-to-wall ratio,” *Indoor and Built Environment*, vol. 29, no.1, pp. 24-39 (2019).

[34] J. H. Park, B. Y. Yun, S. J. Chang, S. Wi, J. Jeon, S. Kim “Impact of a passive retrofit shading system on educational building to improve thermal comfort and energy consumption,” *Energy and Buildings*, vol. 216, p. 109930 (2020).

[35] M. Jradi, C. Veje, B.N. Jørgensen, “Deep energy renovation of the Mærsk office building in Denmark using a holistic design approach,” *Energy and Buildings*, vol. 151, pp. 306-319 (2017).

[36] Raji, B., Martin J. Tenpierik, Andy Van den Dobbelsteen Early-Stage Design “Considerations for the Energy-Efficiency of High-Rise Office Buildings,” *Sustainability*, DOI: 10.3390/su9040623, (2017).

[37] K. EL-DEEB, “Combined Effect Of Window-To-Wall Ratio And Wall Composition On Energy Consumption,” in PLEA, (2013).

[38] Amiri Fard, R., M. Thaghafi, and M. Tahbaz, “Investigating the simultaneous effect of the percentage of transparent surfaces and orientation according to the energy consumption of schools in the temperate and humid climate of Iran. Soffeh”, vol. 30, no. 4: pp. 49-65, (2021).

[39] J. S. Carlos, H. Corvacho, “Retrofit measures in old elementary school buildings towards energy efficiency,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 16, no. 4, pp. 567-576, (2010).

[40] B. Basarir, B.S. Diri, C. Diri, “Energy efficient retrofit methods at the building envelopes of the school buildings,” *Retrieved*, vol. 10, no. 12, p. 2016, (2012).

[41] L. de Santoli, L., F. Fraticelli, F. Fornari, C. Calice, "Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome," *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 196-202, (2014).

[42] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battisini, G. Bernabini, "Retrofit of an Existing School in Italy with High Energy Standards," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1529-1538, (2014).

[43] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. Rossi, G. P. Vanoli, "Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 172-183, (2015).

[44] S. Ostojić, Z. Veršić, I. Muraj, "Energy analysis and refurbishment strategy for Zagreb University buildings: Former Faculty of Technology in Zagreb by Alfred Albini," *Energy and Buildings*, vol.115, pp. 47-54, (2016).

[45] H. Erhorn-Kluttig, O. Mørck, "Energy-efficient renovation of educational buildings," (2005).

[46] McKnight, T. and D. Hess, "Climate zones and types. physical geography: a landscape appreciation. NJ: Prentice Hall, " pp. 205-208, (2000):

[47] T. Raziei, "Climate of Iran according to Köppen-Geiger, Feddema, and UNEP climate classification," *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 148, no. 3, pp. 1395-1416, (2022).